

令和 4 年 4 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12038

研究課題名（和文）ディスプレイ再現画像における ipRGC の知覚への影響の解析とその応用展開

研究課題名（英文）Analysis of the influence of ipRGC on perception of reproduced images on display device and its application

研究代表者

堀内 隆彦（Horiuchi, Takahiko）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30272181

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：自然環境下に設置されたディスプレイ上の再現画像において、内因性光感受性網膜神経節細胞（ipRGC）の知覚への影響を解析することを目的として、カラーマッチング実験を継続的に実施した。その結果、ディスプレイにおいても、ipRGCが色知覚へ影響していることが示唆された。さらに、概日リズムとの環境を調査することによって、非画像形成機能であるM1 ipRGCも色知覚に影響している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、自然環境下に設置されたディスプレイ上においてもipRGCが色覚経路に寄与していることを示すデータが得られたことは、視覚科学の新たな学説のエビデンスとなるだけでなく、産業界のRGBの三刺激値で映像表現を行っている視覚メディアの分野において、より厳密な映像再現にはipRGCの吸収率を含めた表現が必要となることを意味しており、様々な社会実装に変革を及ぼす結果につながる。

研究成果の概要（英文）：Color matching experiments were continuously conducted to analyze the effects of Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs) on the perception of reproduced images on a display set up in a natural environment. The results suggest that ipRGC affects color perception even in images on displays. Furthermore, by investigating the environment in relation to circadian rhythms, it was suggested that M1 ipRGC, a non-image forming function, may also affect color perception.

研究分野：視覚情報工学

キーワード：ipRGC 色再現 視知覚 ディスプレイ 概日リズム

## 1. 研究開始当初の背景

現在の学説では、我々の眼の網膜には錐体と杆体と呼ばれる二種類の視細胞を光受容体として有しており、色や明るさの知覚量を決定するとされている。しかしながら、2003年頃からメラノプシン物質を含む第三の光受容体(ipRGC)が発見され、概日リズムや瞳孔反射に影響することが明らかにされてきた。さらに近年、この ipRGC が外側膝状体から視覚野への視覚経路にも寄与しているという報告があり、研究者による追試が行われている(例えば、Brown et al. 2012)。ipRGC の知覚への寄与の検証には、視覚実験結果が重要な根拠となる。このとき、ipRGC の感度は他の光受容体の感度とオーバーラップしているため、LED 光源からなる多原色刺激を制御することによって、他の光受容体の刺激を等価に保ちながら、ipRGC の刺激のみを可変とする刺激提示法が用いられている。しかし、この方法は刺激の分光分布が LED 原色に制限されるため、厳密で複雑な実験刺激を生成することが困難であり、詳細な検証の障壁となっていた。報告者は2017年度から2年間、科学研究費助成事業挑戦的研究(萌芽)の課題として、単独型分光プロジェクタを用いた ipRGC の視覚的機能の解明に取り組んだ。この研究課題では、任意の分光分布の刺激を生成できるシステムを構築し、過去の実験で生成できなかった狭帯域の刺激や、受容量を大幅に変化させた刺激を生成することにより、より厳密な視覚実験を実施した。その結果、ipRGC が明るさ知覚へ影響することを支持する実験データが得られた。さらに、ipRGC の輝度経路や色覚経路への寄与の可能性も示唆された。以上の学術的背景によれば、「ipRGC が少なからず知覚へ影響を与えている」という学説を支持するエビデンスが年々増加している。

これまでの研究では、視覚科学の解明を目的とされてきたため、積分球を用いた LED 光源の制御や、暗室における分光プロジェクションによる視覚実験に基づいており、それらは光空間を厳重に制御したラボ環境で実施されてきた。先述のように、それらの実験によって ipRGC の知覚への影響は確認されてきたが、そのような統制された実験環境下においても、知覚への影響量はわずかであるとの報告もある。産業応用の工学的観点に立脚した場合、自然環境下における商用の画像出力装置において、ipRGC が知覚に変化を及ぼすほどの影響を与えるか否かを確認することは必要不可欠となるが、これまでにそれらの工学的側面について取り組まれた研究報告はなく、明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、自然環境下に設置されたディスプレイ上の再現画像を対象として、ipRGC の知覚への影響を解析することによって、過去に実施されてきた視覚科学の視点からの解析ではなく、産業的応用に立脚した工学的な応用基盤を確立することを目的とする。具体的には、様々な分光特性を有するディスプレイを対象として、ipRGC の働きを考慮したデバイス依存の色再現モデルの構築を目指す。さらに、産業界において標準化されているデバイス間のカラーマネジメントシステムとの互換を実現するために、ipRGC の受容量をカラープロファイルへ組み込む方法を検討し、カラー画像を対象としたプロトタイプシステムを構築することによって、次世代のカラー画像再現における産業界のデファクトスタンダードとなる基盤を確立する。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、はじめに実生活空間における照明やディスプレイ環境下における ipRGC の影響量を確認する必要がある。本研究開始前から、商用の高輝度ディスプレイ上の再現カラーパッチを対象とした視覚実験を試験的に準備しており、実生活空間においても影響し得る予備データを有していた。当初の計画では、それらの実験データを種々の特性を有するディスプレイを用いて丁寧に積み上げた後に、ipRGC の影響を考慮したデバイス依存の色再現モデルの構築を目指した。さらに、ipRGC のカラープロファイルへの組み込みを検討し、カラー画像を対象としたプロトタイプシステムの構築を通じて、次世代のカラー画像再現における産業界のデファクトスタンダードとなる基盤を確立することを目標としていた。具体的には、(1) 高輝度ディスプレイを対象とした知覚への影響量の解析、(2) 高輝度ディスプレイを対象とした色再現モデルの構築、(3) 低輝度ディスプレイを対象とした知覚への影響量の解析、(4) 低輝度ディスプレイを対象とした色再現モデルの構築、(5) カラープロファイルへの実装、(6) カラー画像を対象としたプロトタイプシステムの構築の6つの課題に取り組むことを計画していた。

## 4. 研究成果

### (1) 高輝度ディスプレイに対する実験

実験では、カラーパッチと高輝度ディスプレイ上の再現色との間でカラーマッチングを実施した。桿体の影響を抑制するために、実測による最大輝度が 1,850 cd/m<sup>2</sup> を有する液晶ディスプレイ(SHARP PN-A601)を使用した。カラーパッチは、X-Rite ColorChecker のパッチ色に基づいて、日本色研によって調色された大判のカラーパッチを使用した。使用した色は、先行研究(Ecker et al. 2010)と同様に、7色(red, moderate red, magenta, blue, blue sky, cyan, white)である。双方の色の分光分布は異なるため、もし ipRGC が色知覚に影響している場合には、必ず

しも色差が最小とはならないことが仮説となる。

#### 実験方法

天井照明は 6000K, 5000K, 4000K, 3000K の 4 種類に設定した。被験者は 6000K では正常色覚を有する男女 6 名 (男性: 5 名, 女性: 1 名), 他の天井照明では男女 11 名 (男性: 9 名, 女性 2 名) であった。結果の安定性を担保するため, 実験はそれぞれ 2 回行った。被験者からディスプレイおよびカラーパッチまでの視距離を 150 cm に設定し, 双方の色を物理的に並置して観察できるように設計した。いずれの色刺激も, 視野角は  $3.4^\circ$  となる。カラーマッチングでは, 被験者が 10 キーを用いて色相, 彩度, 明度を自由に調整した。カラーマッチングの初期値は, 測色的な再現色 (色差が最小となる色) とした。被験者に調色に慣れてもらうため, トレーニングを 10 通り行った後にカラーマッチング実験を行い, 終了時のディスプレイの再現色を, 分光放射輝度計 (KONICA MINOLTA CS-2000) を用いて計測した。

#### 実験結果

実験結果例として, 天井照明 5000K において, カラーマッチング後の再現色の CIE1976 $\Delta E$  色差を求め, 被験者平均を, 測色的な色再現の色差とあわせて図 2 に示す。図のエラーバーは, 標準偏差を示している。測色的な色再現の 7 色の色差平均が 1.4 であったのに対して, カラーマッチング後の色差平均は 4.3 と増加した。また, 6000K では 1.3 が 5.7, 4000K では 1.3 が 5.7, 3000K では 1.4 が 6.2 となり, 全ての天井照明において色差が大幅に増加した。また, 5000K における 7 色の平均の誤差比率を  $L^*a^*b^*$  それぞれで求めると,  $(L^*: a^*: b^*) = (0.03: 0.28: 0.69)$  であった。従来研究において, 見えのモードの違いが明るさ知覚に影響することが知られているが, 本実験は主に色度に影響が及んでおり, モードの影響も排除できていると考える。この結果は, 文献[3]と同様の結果となり, ipRGC がディスプレイの色知覚に影響を与えていることを示唆している。

#### 考察

CIE1931 の RGB 等色関数は負の項を含むため, 基底変換によって CIE1931 XYZ 等色関数が導出された。すなわち, LMS の信号が独立であることを前提に導出された。しかし, 本研究では, LMS 信号は神経節細胞に到達するため, 神経節細胞において LMS 信号に ipRGC のバイアスがかかると仮説を立てた。そこで, 従属変数を「目標のカラーパッチの CIE XYZ」とし, 独立変数を「ipRGC 吸収率」と「カラーマッチング後のディスプレイの CIE XYZ」として重回帰を行うことにより, ipRGC を考慮した XYZ の補正式を導出した。

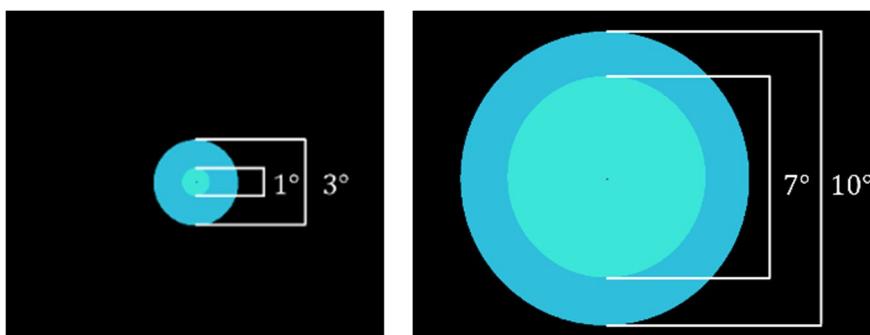
補正した XYZ を用いて色差を再度計算した。補正式を用いることによって, 7 色の平均で 2.9 となり, 色差が改善された。また, 6000K では補正式を用いた色差平均は 4.2, 4000K では 2.4, 3000K では 2.7 であり, 全ての天井照明で色差が改善された。これらの結果から, ipRGC の影響を考慮した色差式の有効性が示唆された。

#### (2) 低輝度ディスプレイに対する実験

より一般的なディスプレイを対象とした影響量を解析するために, 実験システムを配布して, 各被験者の一般環境におけるデータ収集を収集した。概ね高輝度ディスプレイと同等の結果が得られたが, 異なる時間帯におけるカラーマッチング実験に安定性が見られず, 画像形成機能に影響を与えないとされる M1 ipRGC が, 間接的に色知覚に影響する可能性が示唆された。そこで, 当初の研究の計画を変更し, 非画像形成機能の働くとされる M1 ipRGC に対しても実験を行うこととした。

#### 実験方法

検証実験として, ipRGC と M1 ipRGC と関係のある概日リズムの影響を考慮するため, 中心視と周辺視, そして異なる時間帯の昼と夜に, 半年以上かけて合計 290 セッションのカラーマッチングを実施した。ipRGC は視野角  $7^\circ \sim 10^\circ$  に多く存在するため, 図 1 のような小円と大円を設定して行った。カラーマッチングには ipRGC 吸収率が高い青系統の 3 色と, 低い赤系統の 3 色の計 6 色を用いた。



(a) 中心視

(b) 周辺視

図 1 カラーマッチングの設定

## 実験結果

実験結果を表 1 に示す。E<sub>00</sub> 色差によれば、周辺視よりも中心視のほうがカラーマッチングの精度が悪く、また概ね中心視では夜よりも昼の色差が大きく、逆に周辺視では昼よりも夜の色差が大きいといったように、中心視と周辺視それぞれの結果が概日リズムに連動している可能性が示唆された。加えて、同一条件下における複数回のカラーマッチング精度を確認するための検証実験を行った。その結果、中心視では青系の色で、周辺視では赤系の色でばらつきが大きくなり、中心視と周辺視のそれぞれが、概日リズムのときと同様に、色の知覚においても連動している可能性があることがわかった。

表 1 実験の結果

色相 (°)	ipRGC 吸収率 ( $\times 10^{-3}$ )	平均色差 ( E00 )			
		中心視		周辺視	
		昼	夜	昼	夜
5	8.08	0.29	0.30	0.12	0.26
190	206	1.11	1.22	0.79	1.05
210	204	1.85	1.69	1.39	1.65
230	172	1.47	1.21	0.84	0.85
325	70.5	1.08	0.96	1.03	0.95
345	21.3	1.20	1.12	1.11	0.87

## 考察

表 1 に示した検証実験の結果に対して、昼と夜および中心視と周辺視の色差について有意差検定を行った。有意差検定の結果、中心視、周辺視のそれぞれにおける昼夜の有意差は確認できなかったものの、ipRGC の吸収率の高い青系のすべての色(H=190, 210, 230)について、昼の中心視と周辺視の間に有意差が認められた。しかし、夜ではほとんど有意差を確認することができなかった。これは、M1 ipRGC と Non-M1 ipRGC の双方が、色知覚に影響を及ぼす可能性を示唆している。

次に、検証実験の結果に基づき、ipRGC を考慮した色知覚モデルを  $L^*a^*b^*$  と LMS において構築した。その結果、 $L^*a^*b^*$  では H=5 を除いて、概ね色差を改善することができたが、LMS ではその多くで色差を改善することができなかった。

### (3) まとめ

本研究では、2020 年度までに、高輝度ディスプレイを対象とした知覚への影響量の解析、高輝度ディスプレイを対象とした色再現モデルの構築、低輝度ディスプレイを対象とした知覚への影響量の解析に取り組んだ。の実績：ipRGC の受容量の違いに対して知覚がどのように変化するかについて、高輝度ディスプレイを対象としたカラーマッチング実験によって解析を行った。3000K ~ 6000K の 4 種類の照明下において、11 名の被験者を用いて実験を実施した。その結果、ipRGC の吸収帯にエネルギーを有する Blue と White の刺激に対して色差が大きく、また被験者間でばらつきのある安定した結果が得られた。の実績：LMS 信号は神経節細胞に到達するため、神経節細胞において LMS 信号に ipRGC のバイアスがかかると仮説を立てて、ipRGC を考慮した XYZ の非線形最小二乗法により補正式の導出を試みた。の実績：より一般的なディスプレイを対象とし、各被験者の一般環境におけるデータ収集を収集した。概ね高輝度ディスプレイと同等の結果が得られたが、異なる時間帯におけるカラーマッチング実験に安定性が見られなかった。そこで、画像形成機能に影響を与えないとされる M1 ipRGC が、間接的に色知覚に影響する可能性が示唆された。

2021 年度は、2021 年度は、前年度までに M1 ipRGC が色知覚に影響するとされる新たな知見が得られたため、中心視と周辺視において、異なる時間帯の昼と夜に、半年以上かけて合計 290 セッションのカラーマッチングデータを蓄積した。データの解析の結果、中心視と周辺視のそれぞれの色知覚が概日リズムと連動している可能性、および M1 ipRGC と Non-M1 ipRGC の双方が色知覚に影響を及ぼす可能性を示した。

今後の課題の 1 つ目として、本論文で行ったような単純なモデルによる補正式の構築ではなく、より複雑なモデルを用いた補正式の構築が必要である。ipRGC 吸収率にかかる係数を制御する関数の作成を行うなど、本論文とは異なるアプローチ方法をとる必要があると考える。2 つ目として、著者以外の人物による検証実験を行う必要がある。特に、M1 ipRGC の実験では、長期にわたったデータの取得が 1 人のデータしかないため、個人間の結果の差について考察を行うことができない。今後、工学的な応用を考えていくうえで、個人間の結果の差については、

非常の重要な要素になりうると考えられる。そして、3つ目として、生理学的な裏付けが必要である。本論文では実験的に ipRGC による色知覚への影響について検証、考察を行ったが、生理学的な裏付けを行うことで、より明確にその影響について論じることができる。

<引用文献>

T.M. Brown et al.: Melanopsin-Based Brightness Discrimination in Mice and Humans, *Current Biology*, 22, pp.1134- 1141 (2012).

J.L. Ecker et al: Melanopsin-Expressing Retinal Ganglion-cell Photoreceptors: Cellular Diversity and Role in Pattern Vision”, *Neuron*, 67(1), pp.49-60 (2010)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kota Akiba, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of ipRGC on Colour Perception of Display Device under Various Illuminants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Colour Association (AIC) Conference 2021	6. 最初と最後の頁 387-392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kiyosuke Ota, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Preliminary Evidence for the Effect of Circadian Rhythms on Color Perception	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Colour Association (AIC) Conference 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 大津昌也, 田中緑, 堀内隆彦	4. 巻 1
2. 論文標題 視覚特性の個人差を考慮したipRGCが色弁別に与える影響の考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 色彩学	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kota Akiba, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 COLOR MATCHING CONSIDERATION ON THE EFFECT OF IPRGC FOR COLOR REPRODUCTION ON DISPLAY DEVICE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 5th CIE Symposium on Colour and Visual Appearance	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.25039/x47.2020.P039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K.Akiba, M.Tanaka and T.Horiuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental consideration on the effect of ipRGC for color reproduction on display device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. Midterm Meeting of the International Color Association	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 秋葉航太, 田中緑, 堀内隆彦	4. 巻 43
2. 論文標題 ipRGCがディスプレイの色知覚に与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本色彩学会誌	6. 最初と最後の頁 5-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15048/jcsaj.43.3_5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kyosuke Ota, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi
2. 発表標題 Preliminary Evidence for the Effect of Circadian Rhythms on Color Perception
3. 学会等名 International Colour Association (AIC) Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大津昌也, 田中緑, 堀内隆彦
2. 発表標題 視覚特性の個人差を考慮したipRGCが色弁別に与える影響の考察
3. 学会等名 日本色彩学会第53回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Akiba, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi
2. 発表標題 Effect of ipRGC on Colour Perception of Display Device under Various Illuminants
3. 学会等名 International Colour Association (AIC) Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Akiba, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi
2. 発表標題 Color Matching Consideration on the Effect of IPRGC for Color Reproduction on Display Device
3. 学会等名 CIE 5th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kota Akiba, Midori Tanaka, Takahiko Horiuchi
2. 発表標題 Experimental consideration on the effect of ipRGC for color reproduction on display device
3. 学会等名 Midterm Meeting of the International Color Association (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉航太, 田中緑, 堀内隆彦
2. 発表標題 ipRGCがディスプレイの色知覚に与える影響
3. 学会等名 日本色彩学会第50回全国大会
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

堀内研究室 -Research  
<http://dippix.tp.chiba-u.jp/research/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 緑  (Tanaka Midori)  (40780979)	千葉大学・大学院国際学術研究院・助教    (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------